doi:10.13866/j.azr.2019.06.06

1961—2017 年东帕米尔高原极端升温过程气候变化特征[①]

毛炜峄[1,2]， 姚俊强[1,2]， 陈 静[1,2]， 李淑娟[1,2]， 李红军[1,2]， 沈永平[3]
（1. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所，新疆 乌鲁木齐 830002；2. 中亚大气科学研究中心，新疆 乌鲁木齐 830002；
3. 中国科学院西北生态环境资源研究院，甘肃 兰州 730000）

摘 要：利用塔什库尔干、吐尔尕特和乌恰 3 个气象站 1961 年 1 月 1 日至 2017 年 12 月 31 日的逐日最高气温，建立了中巴经济走廊北端东帕米尔高原单站升温过程数据库，用百分位法基于综合强度指标遴选出极端升温过程，对比分析了该区域塔什库尔干等 3 站的极端升温过程频数、强度气候变化特征。结果表明：① 1961—2017 年，东帕米尔高原塔什库尔干共出现 489 次极端升温过程，平均每年出现 8.6 次。塔什库尔干极端升温过程平均持续 3.6 d，以持续 3 d 的最多，占 24.7%，吐尔尕特和乌恰以持续 2～3 d 的极端升温过程为主。塔什库尔干的极端升温过程在 7 月出现最多，吐尔尕特在 5 月最多，乌恰在 1 月最多。② 塔什库尔干综合强度最强的 1 次升温过程出现在 2008 年 2 月 20—21 日。东帕米尔高原 3 站的极端升温过程综合强度均在冬季最强。③ 57 a 来，东帕米尔高原塔什库尔干年极端升温过程频数呈显著的线性增加趋势，增加率为 0.57 次·$(10a)^{-1}$，进入 21 世纪以来，极端升温过程相对频发，年际间变率加剧。吐尔尕特与乌恰的线性变化趋势不显著。④ 57 a 来，塔什库尔干的极端升温过程强度呈显著的线性增强趋势，且近年来年际间变化幅度加剧；乌恰的过程强度略呈下降趋势，近年来年际间变化幅度趋于平缓。总之，塔什库尔干 7 月的极端升温过程最多，57 a 来年极端升温过程频数显著增多、强度显著增强，近年来极端升温过程频数及强度的年际间变化幅度均加剧，造成东帕米尔高原区域融冰（雪）洪水及其衍生地质灾害频发，风险加剧。

关键词：极端升温过程；频数；强度；气候变化；帕米尔高原

IPCC 第五次评估报告重点针对极端事件变化及其风险应对进行了评估，全球变暖背景下，各地极端天气气候事件规律发生变化或导致区域气象灾害频发，灾害风险加剧[1]。中巴经济走廊是连接“21 世纪丝绸之路经济带”与“海上丝绸之路”的唯一通道，北端穿越东帕米尔高原，慕士塔格、公格尔、公格尔九别等高大山峰冰川最为发育[2]。近半个世纪以来，新疆区域呈现出极端暖事件显著增加、极端冷事件显著减少的变化趋势[3-4]。在新疆，夏季气温异常偏高一方面可能引发区域干旱，另一方面可能导致河流源区冰川消融加剧，径流量增多，有时甚至会引发融雪（冰）洪水、融雪（冰）降水混合型洪水，以及冰坝溃决型洪水[5-6]。区域极端温度事件变化引起新疆融雪型洪水规律发生改变。新疆北部是我国冬季三大稳定积雪区之一，我国唯一流入北冰洋的额尔齐斯河发源于此，有实测水文记录的 50 多年来，2005 年 6 月 1—2 日额尔齐斯河第 4 次发生全流域大洪水，这次突发性融雪和降雨造成的混合型洪水给当地造成较大经济损失[7]。在冬季新疆北部出现的极端暖事件同样会引发洪水灾害。2010 年 1 月北疆地区的极端升温过程，造成北疆塔—额盆地积雪在隆冬时节快速消融，发生冬季融雪型洪水[8]。南疆有我国最大的内陆河塔里木河，该河发源于昆仑山、帕米尔高原和天山山区的各大源流，是高温融雪（冰）洪水的高发区。近几十年随着全球变暖，塔里木河流域的融雪（冰）洪水增多、加剧[9-10]。冬季流域内深厚的积雪为位于天山西部的匹里青河洪水提供了丰富的物质储备，4—7 月的热力条件与同期强降雨天气是引发匹里青河洪水灾害的主要动力因素，50 多年实测洪水资料表明，匹里青河洪水发生频次及量级均有增大趋势[11]。2015 年夏季新疆出现大范围高温过程，引发塔里木

① 收稿日期：2018-11-05； 修订日期：2019-08-07
基金项目：国家自然科学基金项目（U1503181）资助
作者简介：毛炜峄（1969-），男，研究员，主要从事气候诊断、预测区域气候变化影响等研究. E-mail：mao6991@vip.sina.com

河源流区域发生洪水,昆仑山—帕米尔高原一带也有险情出现[12]。

关注新疆区域的极端温度事件及其影响,更需加强区域极端升温过程变化规律的研究。在国外,美国科学家于20世纪80年代首先关注极端温度及日较差的研究[13-14],在我国关于极端温度事件较早的研究出现在20世纪90年代后期[15-16]。近年来,区域极端温度、高温热浪变化研究成果较为丰富[17-18]。但是,从变温天气过程角度来研究极端升温过程的成果尚不多见。在前期笔者已经分析了乌鲁木齐市65 a来升温过程的基本规律、极端升温过程气候变化特征[19-20]。瞄准中巴经济走廊北端东帕米尔高原,开展特殊区域极端升温事件研究,在全球变暖背景下为积极应对中巴经济走廊区域极端天气气候事件变化带来的新挑战提供支持。

1 资料与分析方法

1.1 资料

选取东帕米尔高原的塔什库尔干、吐尔尕特站和乌恰站1961年1月1日至2017年12月31日的日最高气温资料,建立各站升温过程数据库,3个气象站具体地理参数见表1。重点分析位于中巴经济走廊关键区域的塔什库尔干极端升温过程的变化特征,并对比帕米尔高原偏北地区的吐尔尕特、乌恰2站的变化特征差异。

表1 东帕米尔高原气象观测站地理参数

Tab.1 The information of the meteorological stations in the east Pamirs

观测站	纬度(N)	经度(E)	海拔高度/m
塔什库尔干	37°47′	75°14′	3 093.7
吐尔尕特	40°31′	75°24′	3 507.2
乌恰	39°43′	75°15′	2 177.5

1.2 升温过程定义

使用单站升温过程定义[19]来建立升温过程数据库。定义中包括升温日、单站升温过程(初日、终日及持续日数)、过程升温幅度、不同时段升温幅度等要素,具体见表2。

表2 单站升温过程基本概念

Tab.2 The basic concepts of temperature-rising process at single station

概念	定义
升温日	观测站日最高气温较前一天上升,即当天的$\Delta T_{24}>0.0$ ℃,则定义为一个气温上升日,简称为升温日
升温过程、升温过程初日及终日	观测站24 h变温由$\Delta T_{24}\leq0.0$ ℃转为>0.0 ℃的第一天定义为升温过程初日,持续到再次出现$\Delta T_{24}\leq0.0$ ℃的前一天,称为升温过程终日,从过程初日到终日称为一次升温过程
过程持续日数	升温过程初终日之间(含初、终日)的天数称为升温过程持续日数
过程升温幅度	升温过程终日与过程初日前一天之间的日最高气温差,称为过程升温幅度
过程最大24 h升温幅度	升温过程中所有ΔT_{24}中的上升幅度最大者称之为过程最大24 h升温幅度
过程最大48 h升温幅度	升温过程中所有ΔT_{48}中的上升幅度最大者称之为过程最大48 h升温幅度,如果升温过程持续不足2 d,则过程最大48 h升温幅度不统计
过程最大72 h升温幅度	升温过程中所有ΔT_{72}中的上升幅度最大者称之为过程最大72 h升温幅度,如果升温过程持续不足3 d,那么过程最大72 h升温幅度不统计
过程最高气温	升温过程终日的日最高气温值
过程最大距平幅度	升温过程中所有日最高气温与同日多年平均值之差的最大值

1.3 升温过程综合强度指数

选出过程升温幅度、过程最大24 h升温幅度、过程最高气温和过程最大距平幅度4个要素,分别计算其标准化值I_F、I_{T24}、I_{TG}和I_{JP},再计算4个单要素标准化指数之和,作为升温过程综合强度指数IZ[20],见式(1)。根据综合指数IZ由高到低排序,选取强度排位前10%的过程作为极端升温过程。

$$IZ=I_F+I_{T24}+I_{TG}+I_{JP} \tag{1}$$

1.4 过程发生频数及强度的季、月统计标准

以1月1日至12月31日为一年,共计57个完整年度,3—5月为春季,6—8月为夏季,9—11月为秋季,12月至翌年2月为冬季。春、夏、秋、冬四季升温过程发生频数统计标准为:过程的开始日期与结束日期在同一季节,则记为该季节1次过程,如果升温过程的开始日期和结束日期跨2个相邻季节,则2个季节各记录0.5次升温过程。各月的升温过程频数统计方法类似。各季的升温过程强度要素统计标准为:过程的开始日期与结束日期在同一季节内,则该过程要素参与该季节统计;如果升温过程的开始日期和结束日期跨2个相邻季节,则计算2个季节的升温过程强度要素指标时,均考虑该过程贡献。各月的降温过程强度统计方法类似。

2 极端升温过程基本特征

2.1 极端升温过程频数

1961—2017 年,塔什库尔干出现 4 898 次升温过程。根据综合强度指数 *IZ* 选取排位在前 10% 原则,选出 489 次极端升温过程,平均每年出现 8.6 次。由表 3 和图 1 可见,57 a 来,塔什库尔干的极端升温过程主要集中在春夏季 4—7 月,7 月最多,占全年总频数的 17.0%,10 月最少。吐尔尕特和乌恰平均每年分别出现 9.4 和 9.3 次极端升温过程,吐尔尕特的极端升温过程主要集中在春夏季 3—6 月,5 月最多,占全年的 12.6%,10 月最少;乌恰的极端升温过程主要集中在冬春季 12—5 月,1 月最多,占全年的 12.7%,9 月最少。

东帕米尔高原是中巴走廊关键区域,该区域融冰(雪)洪水的物质基础极其丰富,是中巴经济走廊沿线的融冰(雪)洪水及其次生灾害的高风险区域。南部区域海拔相对更高,冰川更为集中[2],升温及其引起的冰雪融水增加影响冰川跃动,该区域冰川跃动灾害风险高[21]。中巴喀喇昆仑公路自 1979 年通车以来,所处高山峡谷冰川地带,冰川活跃,公路沿线雪崩、泥石流、坍方、滑坡、岩崩等灾害频发[22-23]。塔什库尔干的极端升温过程在盛夏 7 月出现频率最高,也是当地一年之中最热时段,该区域夏季融雪(冰)洪水发生风险更高,极端升温过程以及降水过程造成的混合型洪水及其衍生地质灾害风险也在加剧。

2.2 极端升温过程持续日数

由图 2 和表 4 可见,东帕米尔高原塔什库尔干极端升温过程持续日数 1 ~ 10 d,以持续 3 d 的最多,之后随极端升温过程持续日数增加,过程频数百分率下降显著。塔什库尔干 489 次极端升温过程持续日数平均 3.6 d,持续 3 d 的占 24.7%。在塔什库尔干偏北方向的吐尔尕特,极端升温过程持续日数 1 ~ 9 d,以持续 2 d 的最多,534 次极端升温过程持续日数平均 3.1 d,持续 2 d 的占 27.5%。在塔什库尔干以北海拔略低的乌恰,极端升温过程持续日数 1 ~ 13 d,以持续 3 d 的最多,528 次极端升温过程持续日数平均 3.2 d,持续 3 d 的占 21.6%。在东帕米尔高原相对偏南的塔什库尔干,极端升温过程平均持续日数较长。

从表 5 可见,帕米尔高原 3 站的极端升温过程持续日数的各月平均值有明显区别,均以 8—9 月的持续日数最长,由深秋到隆冬季节的 11—1 月最短。8 月份的极端升温过程持续日数相对较长,加大了升温过程的热量积累效应,有利于当地冰川积雪消融量增大。

2.3 极端升温过程强度

2.3.1 单要素强度 以过程升温幅度、过程最大 24 h、48 h、72 h升温幅度以及过程最大距平幅度分

表 3 东帕米尔高原各站逐月极端升温过程频数

Tab. 3 Monthly frequency of extreme temperature-rising process in the east Pamirs /次

观测站	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	年
塔什库尔干	42.5	47.0	43.5	52.5	54.5	58.5	83.0	45.0	16.5	2.5	4.0	39.5	489
吐尔尕特	48.0	49.0	59.0	65.0	67.5	53.5	49.0	29.5	21.5	21.0	32.5	38.5	534
乌恰	67.0	61.0	57.5	61.5	54.5	34.5	47.0	21.5	17.0	19.0	29.0	58.5	528

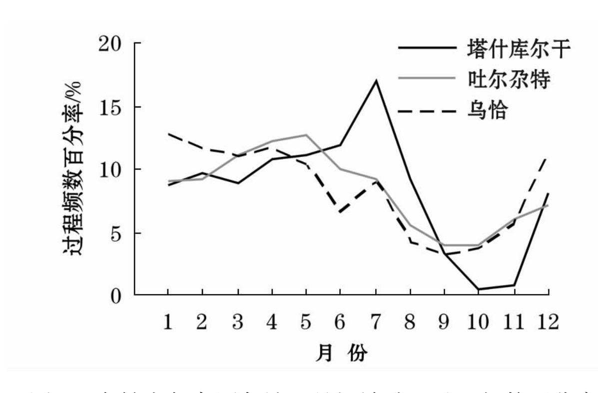


图 1 东帕米尔高原各站逐月极端升温过程频数百分率

Fig. 1 Monthly variation of frequency of extreme temperature-rising process in the east Pamirs

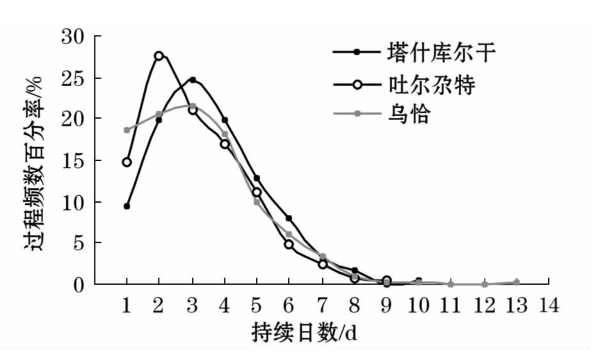


图 2 东帕米尔高原各站持续日数的极端升温过程频数百分率

Fig. 2 The percentage of frequency of extreme temperature-rising process with sustained days in the east Pamirs

表 4　东帕米尔高原各站持续日数的极端升温过程频数分布

Tab. 4　Frequency of extreme temperature-rising process with sustained days in the east Pamirs　/次

观测站	1 d	2 d	3 d	4 d	5 d	6 d	7 d	8 d	9 d	10 d	11 d	12 d	13 d	合计
塔什库尔干	46	97	121	97	63	39	15	8	0	3	0	0	0	489
吐尔尕特	79	147	112	91	60	26	13	4	2	0	0	0	0	534
乌恰	98	109	114	96	53	32	18	5	1	1	0	0	1	528

表 5　东帕米尔高原各站逐月极端升温过程平均持续日数

Tab. 5　Monthly sustained days of extreme temperature-rising process in the east Pamirs　/d

观测站	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	年
塔什库尔干	2.9	3.4	4.0	4.0	4.0	4.0	3.8	3.6	4.2	4.0	3.0	2.2	3.6
吐尔尕特	2.6	3.4	3.0	3.5	3.7	3.6	3.8	3.9	3.0	2.8	2.3	2.6	3.1
乌恰	2.3	2.5	3.2	4.0	4.1	3.9	4.0	4.6	3.8	3.3	2.8	2.5	3.2

表 6　东帕米尔高原 3 站单要素强度表征的最强极端升温过程

Tab. 6　The extreme temperature-rising process with the strongest intensity at 3 stations in the east Pamirs

单要素强度	塔什库尔干			吐尔尕特			乌恰		
	平均值 /℃	最大值 /℃	出现日期	平均值 /℃	最大值 /℃	出现日期	平均值 /℃	最大值 /℃	出现日期
过程升温幅度	8.9	18.6	2006-01-27—2006-01-28	9.6	20.4	1971-03-09—1971-03-16	10.7	24.0	1976-04-18—1976-04-20
过程最大 24 h 升温幅度	4.9	15.2	2008-02-20—2008-02-21	5.8	13.7	2012-02-18	6.5	22.3	1976-04-18—1976-04-20
过程最大 48 h 升温幅度	6.8	18.6	2006-01-27—2006-01-28	7.7	16.3	1987-01-22—1987-01-25	8.4	22.9	1976-04-18—1976-04-20
过程最大 72 h 升温幅度	8.0	18.0	1992-02-25—1992-02-27	8.9	19.2	1987-01-22—1987-01-25	9.9	24.0	1976-04-18—1976-04-20
过程最高气温	17.8	32.5	1997-07-15—1997-07-17	8.7	23.8	1983-07-28—1983-07-30	18.3	34.6	1982-07-30—1982-08-02
过程最大距平幅度	5.0	14.3	1993-01-30—1993-02-08	5.8	12.9	1988-02-01—1988-02-04	6.2	17.9	1988-02-02—1988-02-04

别为单要素指标,1961—2017 年,塔什库尔干 5 项单要素表征的最强升温过程分别出现在冬季 1、2 月(表 6)。对比 3 站单要素强度指标表征的最强升温过程发现,吐尔尕特的 5 项单要素最强的升温过程分别出现在 1、2、3 月,乌恰分别出现在 2 月和 4 月。3 站以过程最高气温为单要素指标判识出的最强升温过程均出现在夏季 7 月。

2.3.2　综合强度　根据式(1),计算基于过程升温幅度、过程最大 24 h 升温幅度、过程最高气温和过程最大距平幅度 4 个单要素的综合强度指数 *IZ*,作为单站升温过程综合强度指标。由图 3 可见,1961—2017 年,塔什库尔干强度最大的 1 次极端升温过程出现在 2008 年 2 月 20—21 日,综合强度指数 *IZ* 为 13.6,持续 2 d,过程升温幅度 15.3 ℃,过程最大 24 h 升温幅度 15.2 ℃,过程最高气温 8.2 ℃,过程最大距平幅度 7.7 ℃。综合强度最强的升温过程出现在冬季 2 月下旬,是当地温度开始回升季节,最高气温由 0 ℃以下上升到接近 10 ℃,温度急剧上升带来的热量条件改变有利于当地固态积雪融化为液态水,也是能否大量融化形成洪水温度变化敏感区间。

帕米尔高原偏北位置的吐尔尕特最强升温过程出现在 1971 年 3 月 9—16 日,综合强度指数 *IZ* 为 11.4,持续 8 d,过程升温幅度 20.4 ℃,过程最大 24 h 升温幅度 7.5 ℃,过程最高气温 9.2 ℃,过程最大距平幅度 11.3 ℃。乌恰最强升温过程出现在 1976 年 4 月 18—20 日。综合强度指数 *IZ* 为 16.2,持续 3 d,过程升温幅度 24.0 ℃,过程最大 24 h 升温幅度 22.3 ℃,过程最高气温 24.0 ℃,过程最大距平幅度 6.3 ℃。这 2 个观测站的最强升温过程出现在春季 3—4 月,同样是气温快速回升的季节。

分别选取综合强度指数 *IZ* 由高到低排序的前 10% 过程作为各站的极端升温过程,整理出各站每月出现的极端升温过程的综合强度平均值(表7)。

注：FD24 表示过程 24 h 升温幅度；FD48 表示过程最大 48 h 升温幅度；FD72 表示过程最大 72 h 升温幅度；TTJP 表示过程最大距平幅度；TTGG 表示过程最高气温；TG-ave 表示多年平温值。

图 3 东帕米尔高原 3 站综合强度最强的极端升温过程

Fig. 3 Extreme temperature-rising process with the strongest comprehensive intensity at 3 stations in the east Pamirs

表 7 东帕米尔高原 3 站各月份极端升温过程平均综合强度指数

Tab. 7 Monthly average intensity index of extreme temperature-rising process at 3 stations in the east Pamirs

观测站	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	年
塔什库尔干	5.4	5.6	5.6	4.6	4.8	4.9	4.9	4.7	4.7	4.4	4.7	5.3	5.0
吐尔尕特	4.9	5.4	5.4	5.3	5.1	4.8	5.1	4.7	4.6	5.2	5.2	5.2	5.1
乌恰	5.1	5.1	5.0	5.2	5.1	4.4	4.5	4.2	4.2	4.5	5.0	5.5	5.0

1961—2017 年，塔什库尔干、吐尔尕特和乌恰的极端升温过程综合强度最强的月份分别为 2 月、2 月和 12 月，综合强度月平均值分别为 5.6、5.4 和 5.5，最弱的月份分别是 10 月、9 月和 8 月，综合强度月平均值分别为 4.4、4.6 和 4.2。

3 极端升温过程频数变化

3.1 塔什库尔干的频数变化特征

3.1.1 年际变化 如图 4 所示，东帕米尔高原塔什库尔干出现极端升温过程最多的年份是 2011 年，达

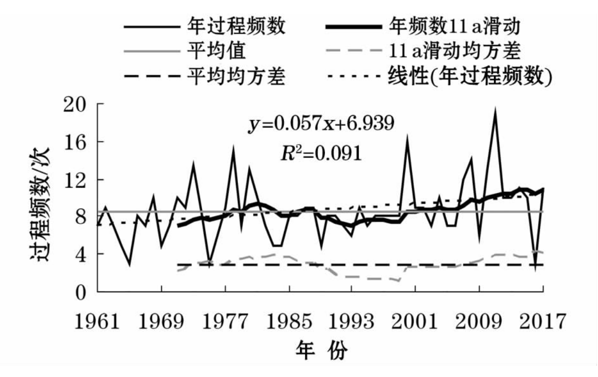


图 4 1961—2017 年塔什库尔干极端升温过程频数逐年曲线

Fig. 4 Annual frequency of extreme temperature-rising process in Taxkorgan during 1961－2017

19 次,最少的年份是 1975 年和 2016 年,同为 3 次;1961—2017 年,过程频数呈线性增加趋势,增加速率为 0.57 次·$(10a)^{-1}$,变化趋势通过了 0.05 信度水平下的显著性检验。1961—2017 年,东帕米尔高原塔什库尔干春、夏、秋、冬四季的极端升温过程频数均呈线性增加趋势,但不显著,增加率分别为 0.13 次·$(10a)^{-1}$、0.24 次·$(10a)^{-1}$、0.04 次·$(10a)^{-1}$和 0.16 次·$(10a)^{-1}$(图 5)。

3.1.2　年代际变化　如图 4 所示,以 11 a 为滑动窗口,计算年极端升温过程发生频数序列的滑动平均值和滑动标准差,将 1961—1971 年的 11 a 平均值及其标准差标注在 1971 年,之后结果以此类推。1961—2017 年,塔什库尔干的年极端升温过程频数 11 a 滑动平均值在 21 世纪初发生了转折,距平值由负转为正,之后并一直持续正距平;11 a 滑动均方差在近 10 a 明显偏大。

将 1961—2017 年分为 6 个年代际时段,前 50 a 每 10 a 为 1 个时段,2011—2017 年为最后时段,整理出 6 个年时段以及四季极端升温过程频数年平均值(表 8)。塔什库尔干年极端升温过程年频数在 2011—2017 年最多,平均每年出现 10.6 次。年极端升温过程频数在 21 世纪以来出现较频繁。

3.2　吐尔尕特与乌恰的变化特征对比

对比东帕米尔高原位置更为偏北的吐尔尕特与乌恰的极端升温过程变化特征,由图 6 可见,1961—2017 年,吐尔尕特和乌恰的年极端升温过程频数最大值分别达到 14.5 次(2010 年)和 17 次(1998、2010 年并列);57 a 来,2 站年极端升温过程频数的线性增加率分别为 0.22 次·$(10a)^{-1}$和 0.18 次·$(10a)^{-1}$,均未通过 0.05信度水平下的显著性检验。

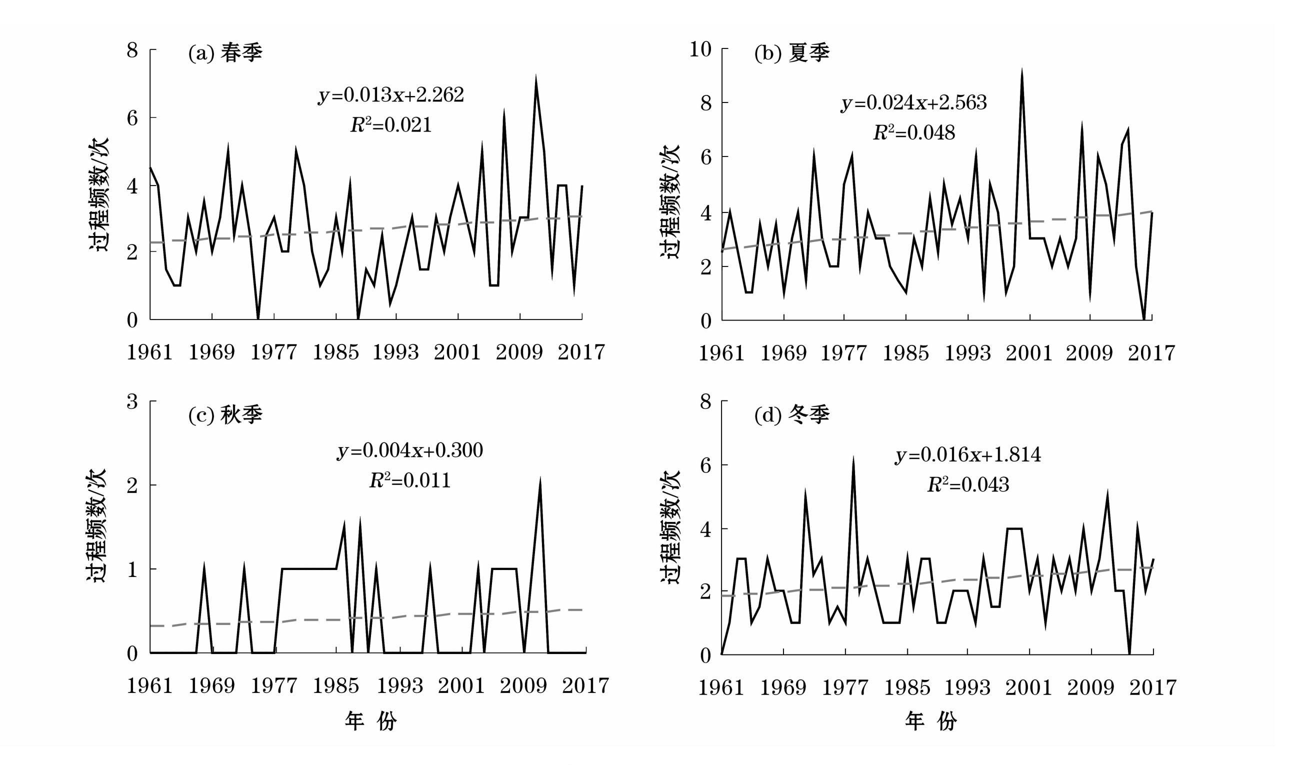


图 5　1961—2017 年塔什库尔干四季极端升温过程频数逐年曲线

Fig. 5　Seasonal frequency of extreme temperature-rising process in Taxkorgan during 1961 – 2017

表 8　东帕米尔高原塔什库尔干极端升温过程频数年代际变化

Tab. 8　The interdecadal variation of frequency of extreme temperature-rising process in Taxkorgan in the east Pamirs　/次

观测站	季节	1961—1970 年	1971—1980 年	1981—1990 年	1991—2000 年	2001—2010 年	2011—2017 年	1961—2017 年
塔什库尔干	春	2.8	2.9	2.0	2.3	3.3	2.9	2.7
	夏	2.7	3.5	3.0	3.9	3.5	3.3	3.3
	秋	0.2	0.4	1.0	0.1	0.6	0.3	0.4
	冬	2.0	2.8	1.6	2.8	2.6	2.1	2.3
	年	6.8	9.4	7.4	8.5	9.4	10.6	8.6

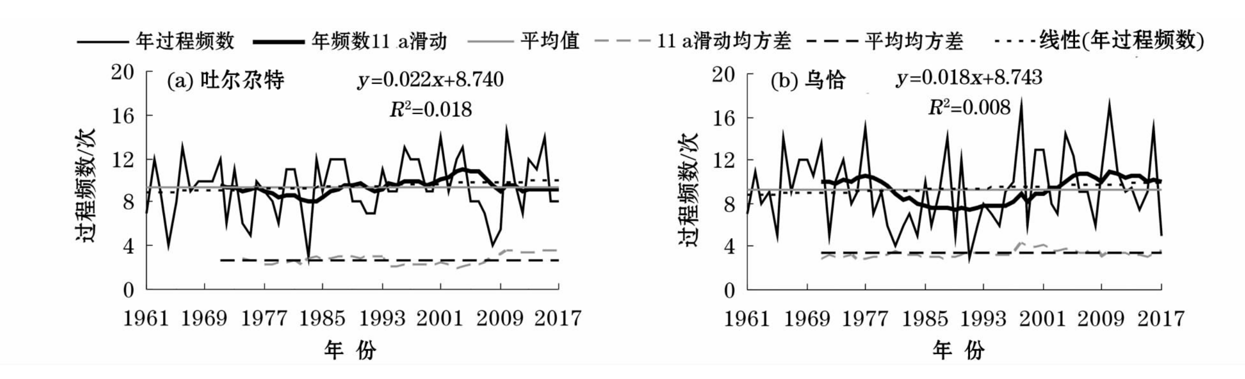


图 6　1961—2017 年东帕米尔高原 2 站极端升温过程频数逐年曲线

Fig. 6　Annual frequency of extreme temperature-rising process at 2 stations in the east Pamirs during 1961 – 2017

吐尔尕特年极端升温过程频数 11 a 滑动平均值在 20 世纪 80 年代后期距平值由负转为正，近 10 a 又接近平均值；11 a 滑动均方差在近 10 a 来明显偏高。乌恰年极端升温过程频数 11 a 滑动平均值在 20 世纪 70 年代后期距平值由正转负，之后又于 21 世纪初由负转为正并维持；11 a 滑动均方差在近些年接近平均值。

1961—2017 年东帕米尔高原塔什库尔干的年极端升温过程频数显著增多，其他 2 站的增多趋势不显著，近 10 a 塔什库尔干与吐尔尕特极端升温过程频数的年际间变率增大，变化幅度加剧。

4　极端升温过程强度变化

4.1　塔什库尔干的强度变化特征

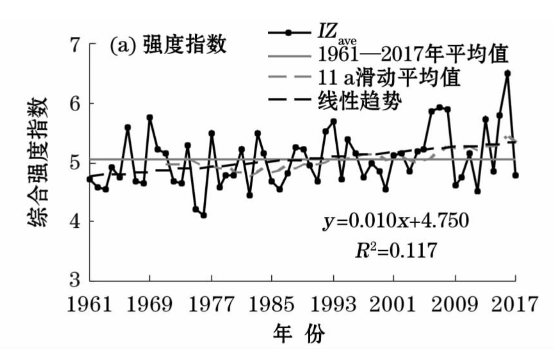
4.1.1　综合强度年际变化　根据式（1）分别计算各站升温过程综合强度 IZ，将 IZ 由大到小排序的前 10% 作为极端升温过程，以每年所有极端升温过程综合强度平均值 IZ_{ave} 作为该站当年极端升温过程的年平均综合强度指标，分析 IZ_{ave} 变化特征。由图 7 可见，57 a 来，塔什库尔干的 IZ_{ave} 呈线性增大趋势，通过了 0.05 信度水平下的显著性检验。IZ_{ave} 的 11 a 滑动均方差反映出进入 21 世纪以来，塔什库尔干极端升温过程年强度年际间变化加剧。

由图 8 可见，以塔什库尔干每年所有升温过程中的综合强度最大值 IZ_{max} 为当年极端升温过程强度指标，57 a 来，塔什库尔干的 IZ_{max} 均呈线性增大趋势，通过了 0.01 信度水平下的显著性检验。进入 21 世纪以来，综合强度 IZ_{max} 的 11 a 滑动均方差明显增大，极端升温过程年强度的年际间变化幅度明显加剧。

4.1.2　综合强度年代际变化　分别计算 6 个不同时段 IZ_{ave} 和 IZ_{max} 平均值（表 9），对比分析东帕米尔高原塔什库尔干极端升温过程年强度年代际变化特征。以 IZ_{ave} 为指标，塔什库尔干在 21 世纪以来明显偏强。以 IZ_{max} 为指标，塔什库尔干在 21 世纪 10 年代最强。

4.2　吐尔尕特与乌恰的强度变化特征对比

由图 9 可见，57 a 来，吐尔尕特的极端升温过程年平均综合强度 IZ_{ave} 呈线性增大趋势，乌恰呈减小趋势。吐尔尕特 IZ_{ave} 的 11 a 滑动均方差近年来增



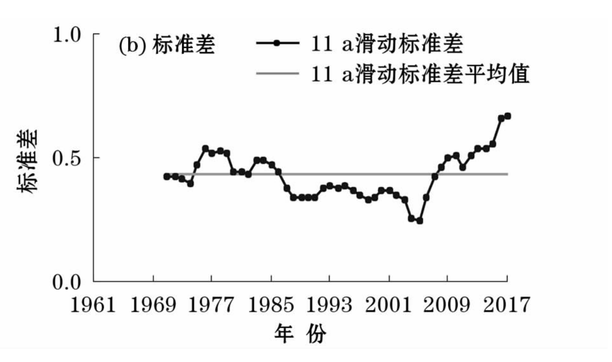


图 7　1961—2017 年东帕米尔高原塔什库尔干极端升温过程年平均强度指数 IZ_{ave} 年际变化

Fig. 7　Annual variation of average intensity index IZ_{ave} of extreme temperature-rising process in Taxkorgan in the east Pamirs during 1961 – 2017

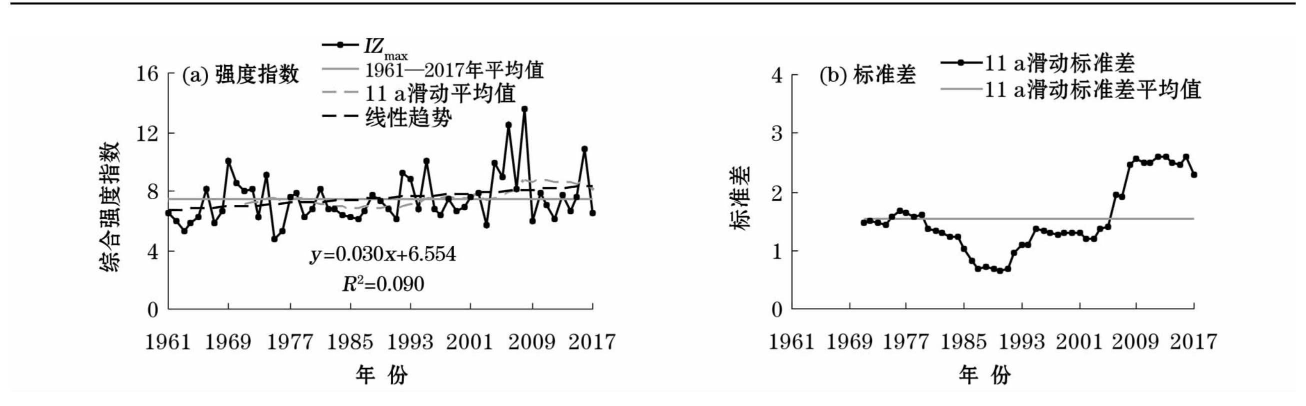


图 8 1961—2017 年东帕米尔高原塔什库尔干极端升温过程年最高强度指数 IZ_{max} 年际变化

Fig. 8 Annual variation of maximum intensity index IZ_{max} of extreme temperature-rising process in Taxkorgan in the east Pamirs during 1961 – 2017

表 9 东帕米尔高原 3 站极端升温过程综合强度指数年代际变化

Tab. 9 The interdecadal variation of intensity indexes of extreme temperature-rising process at 3 stations in the east Pamirs

年代	IZ_{ave}			IZ_{max}			年代	IZ_{ave}			IZ_{max}		
	塔什库尔干	吐尔尕特	乌恰	塔什库尔干	吐尔尕特	乌恰		塔什库尔干	吐尔尕特	乌恰	塔什库尔干	吐尔尕特	乌恰
1961—1970	4.9	5.0	5.1	6.9	6.8	8.1	2001—2010	5.3	5.3	4.9	8.8	7.5	7.7
1971—1980	4.8	5.2	4.8	7.0	7.7	8.2	2011—2017	5.2	5.3	5.0	7.5	7.3	7.3
1981—1990	5.0	5.1	5.0	6.9	7.4	7.6	1961—2017	5.0	5.1	5.0	7.4	7.2	7.8
1991—2000	5.0	4.8	5.0	7.5	6.9	7.7							

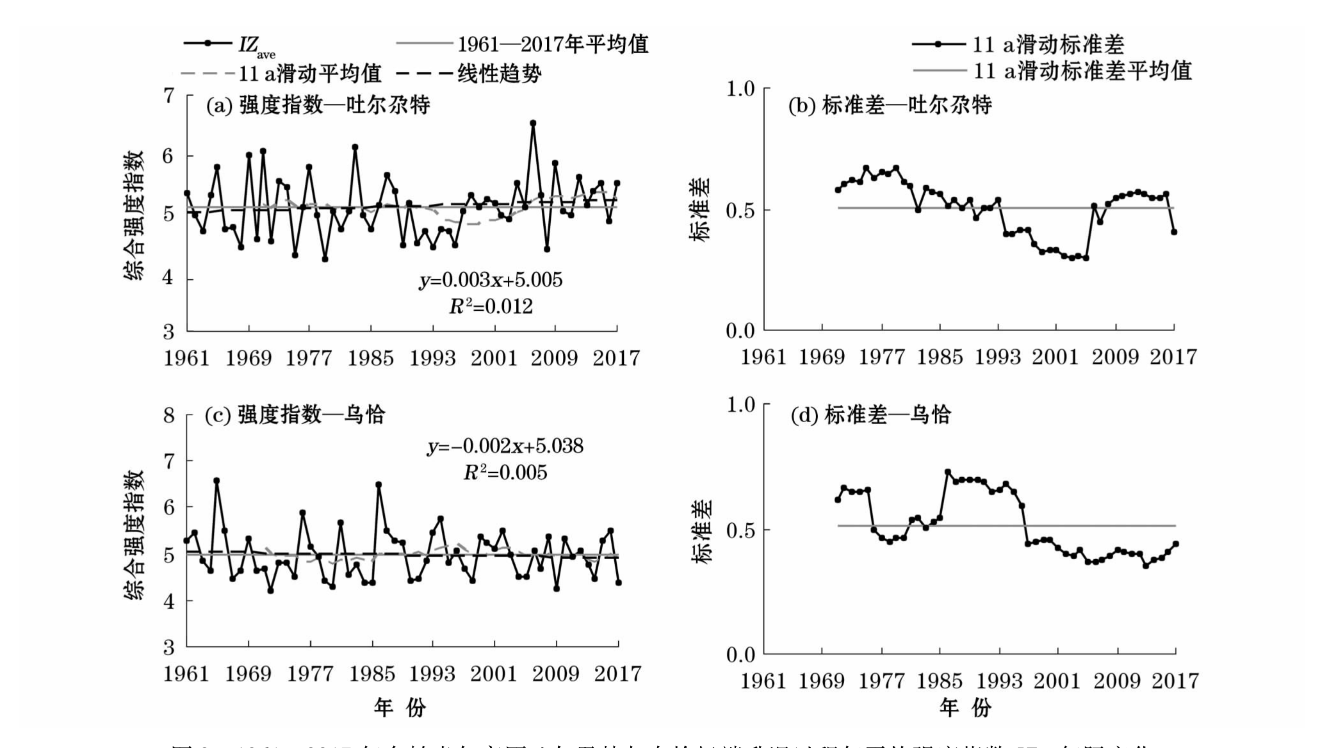


图 9 1961—2017 年东帕米尔高原吐尔尕特与乌恰极端升温过程年平均强度指数 IZ_{ave} 年际变化

Fig. 9 Annual variation of average intensity index IZ_{ave} of extreme temperature-rising process in Torugart and Wuqia in the east Pamirs during 1961 – 2017

大,升温过程年强度年际间变化幅度略加剧,而乌恰 IZ_{ave} 的 11 a 滑动均方差维持低值,年际间变化趋于平缓。同样,由图 10 可见,57 a 来,年最大强度 IZ_{max} 变化与年平均强度 IZ_{ave} 一致,吐尔尕特呈线性

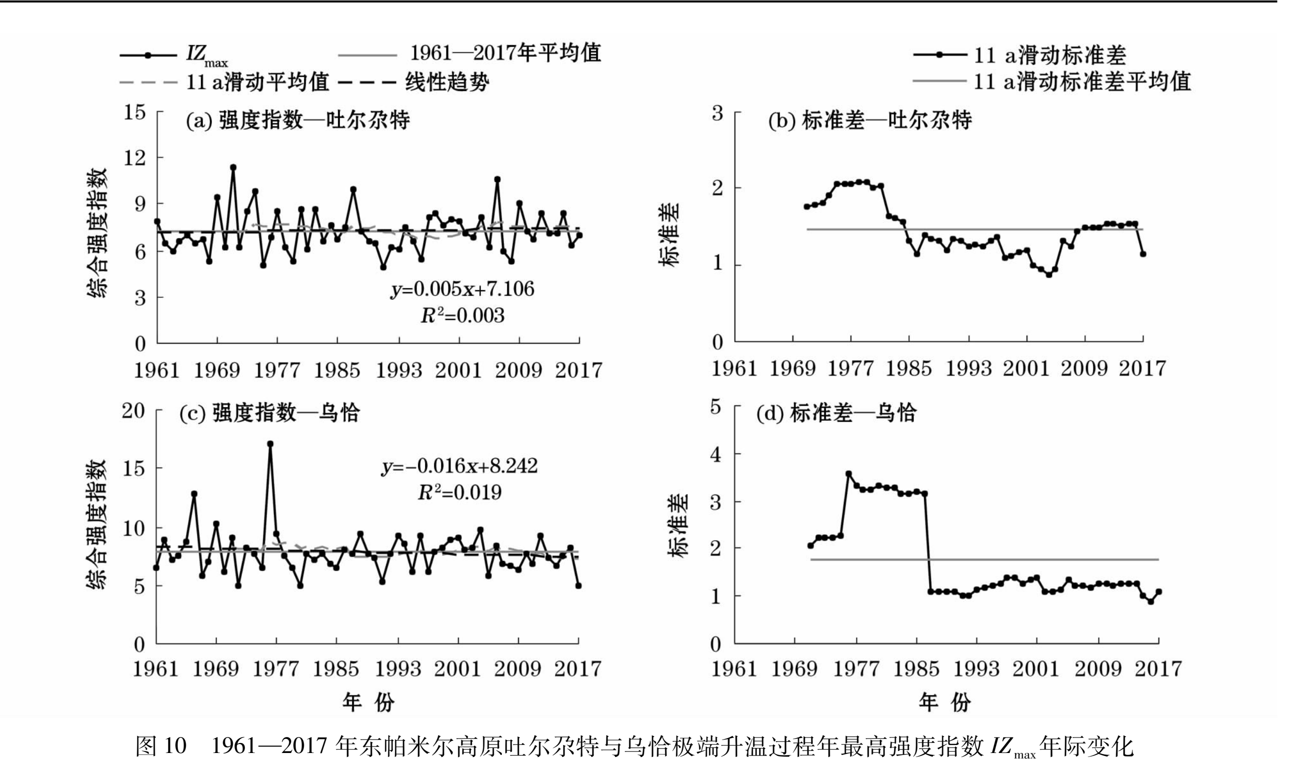


图 10 1961—2017 年东帕米尔高原吐尔尕特与乌恰极端升温过程年最高强度指数 IZ_{max} 年际变化

Fig. 10 Annual variation of maximum intensity index IZ_{max} of extreme temperature-rising process in Torugart and Wuqia in the east Pamirs during 1961 – 2017

增大趋势,乌恰呈减小趋势。IZ_{max} 的 11 a 滑动均方差变化反映出,吐尔尕特、乌恰在 20 世纪 70 年代前后的年际间变化幅度较剧烈,进入 21 世纪以来年际间变化幅度相对平稳。

进入 21 世纪以来,塔什库尔干极端升温过程年强度的年际间变化明显加剧,近年来乌恰升温过程年强度的年际间变化幅度趋于平缓。由表 9 可见,以 IZ_{ave} 为指标,塔什库尔干和吐尔尕特在 21 世纪以来明显偏强,乌恰在 20 世纪 60 年代最强,近 7 a 略增强。以 IZ_{max} 为指标,塔什库尔干在 21 世纪 10 年代最强,吐尔尕特最强时段在 20 世纪 70 年代,在进入 21 世纪以来偏强;乌恰在 20 世纪 70 年代最强,进入 21 世纪以来明显偏弱。

塔什库尔干位于我国东帕米尔高原偏南区域,57 a 来年极端升温过程频数显著增多,近年来极端升温过程频数的年际间变化幅度加剧;塔什库尔干和吐尔尕特在 21 世纪以来极端升温过程的强度明显偏强,造成东帕米尔高原区域的融冰(雪)洪水及其衍生地质灾害频发,灾害风险加剧。而在位置略偏北的吐尔尕特和乌恰,多年来极端升温过程频数和强度变化趋势均不显著。偏南的塔什库尔干区域是东帕米尔高原极端升温引发融雪(冰)洪水及其衍生地质灾害的重点区域。

5 结 论

(1) 1961—2017 年东帕米尔高原塔什库尔干出现 489 次极端升温过程,平均每年出现 8.6 次,主要集中在春夏季,7 月最多;吐尔尕特的极端升温过程在 5 月最多,乌恰在冬季 1 月最多。塔什库尔干的极端升温过程持续日数分别为 3.6 d,持续 3 d 的过程最多,吐尔尕特和乌恰均以持续 2 ~3 d 的极端升温过程频数最多,纬度较低位置相对偏南的塔什库尔干极端升温过程平均持续日数较长。

(2) 东帕米尔高原 3 站的单要素强度的最强升温过程不完全一致。塔什库尔干综合强度最强的 1 次升温过程出现在 2008 年 2 月 20—21 日,吐尔尕特出现在 1971 年 3 月 9—16 日,乌恰出现在 1976 年 4 月 18—20 日。塔什库尔干、吐尔尕特和乌恰 3 站的极端升温过程综合强度最强的月份分别为 2 月、2 月和 12 月。

(3) 1961—2017 年,东帕米尔高原塔什库尔干年极端升温过程频数呈显著的线性增加趋势,增加率为 0.57 次·$(10a)^{-1}$,春、夏、秋、冬四季的极端升温过程频数均呈增多趋势。进入 21 世纪以来,塔什库尔干极端升温过程相对频发,年际间变率加剧。吐尔尕特与乌恰的线性变化趋势不显著。

(4) 以极端升温过程的年平均强度指数 IZ_{ave} 和年最大强度指数 IZ_{max} 的变化特征均显示出,57 a 来塔什库尔干的极端升温过程强度呈显著的线性增强趋势,且近年来年际间变化幅度加剧;乌恰的过程强度略呈下降趋势,近年来年际间变化幅度趋于平缓。

(5) 塔什库尔干位于我国东帕米尔高原偏南区域,是东帕米尔高原由极端升温过程变化引发融雪(冰)洪水及其衍生地质灾害风险加剧的重点区域。

参考文献(References):

〔1〕 沈永平,王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认识的最新科学要点〔J〕. 冰川冻土,2013,35(5):1 068 –1 076.〔Shen Yongping,Wang Guoya. Key findings and assessment results of IPCC WGI Fifth Assessment Report〔J〕. Journal of Glaciology and Geocryology,2013,35(5):1 068 –1 076.〕

〔2〕 施雅风. 简明中国冰川目录〔M〕. 上海:上海科技普及出版社,2005.〔Shi Yafeng. Concise Glacier Inventory of Chinese〔M〕. Shanghai: Shanghai Science and Technology Popularization Press,2005.〕

〔3〕 施雅风,沈永平,胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号影响和前景初步探讨〔J〕. 冰川冻土,2002,24(3):219 –226.〔Shi Yafeng,Shen Yongping,Hu Ruji. Preliminary study on signal,impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in Northwest China〔J〕. Journal of Glaciology and Geocryology,2002,24(3):219 –226.〕

〔4〕 Jiang Y A,Chen Y,Zhao Y Z,et al. Analysis on changes of basic climatic elements and extreme events in Xinjiang,China during 1961 –2010〔J〕. Advances in Climate Change Research,2013,4(1):20 –29.

〔5〕 章曙明,王志杰,尤平达,等. 新疆地表水资源研究〔M〕. 北京:中国水利水电出版社,2008.〔Zhang Shuming,Wang Zhijie,You Pingda,et al. Research on Surface Water Resources in Xinjiang〔M〕. Beijing:China Water & Power Press,2008.〕

〔6〕 沈永平,苏宏超,王国亚,等. 新疆冰川、积雪对气候变化的响应(Ⅰ):水文效应〔J〕. 冰川冻土,2013,35(3):513 –527.〔Shen Yongping,Su Hongchao,Wang Guoya,et al. The responses of glaciers and snow cover to climate change in Xinjiang(Ⅰ):Hydrological effects〔J〕. Journal of Glaciology and Geocryology,2013,35(3):513 –527.〕

〔7〕 努尔兰·哈再孜,马哈提·穆拉提别克,玛哈萨提·哈孜哈力. 新疆额尔齐斯河流域“2005·6·1”大洪水分析〔J〕. 干旱区研究,2013,30(6):981 –985.〔Nuerlan Hazaiz,Mahat Mulatibiek,Mahasat Hazihali. A flood in the Ertix River Basin in Xinjiang〔J〕. Arid Zone Research,2013,30(6):981 –985.〕

〔8〕 毛炜峄,张旭,杨志华,等. 卫星遥感首次监测到准噶尔盆地西北部的冬季融雪洪水〔J〕. 冰川冻土,2010,32(1):211 –214.〔Mao Weiyi,Zhang Xu,Yang Zhihua,et al. Winter snowmelt flood in the northwest of Junggar Basin first monitored by satellite remote sensing〔J〕. Journal of Glaciology and Geocryology,2010,32(1):211 –214.〕

〔9〕 沈永平,王顺德,王国亚,等. 塔里木河流域冰川洪水对全球变暖的响应〔J〕. 气候变化研究进展,2006,2(1):32 –35.〔Shen Yongping,Wang Shunde,Wang Guoya,et al. Response of glacier flash flood to global warming in Tarim River Basin〔J〕. Climate Change Research,2006,2(1):32 –35.〕

〔10〕 沈永平,苏宏超,王国亚,等. 新疆冰川、积雪对气候变化的响应(Ⅱ):灾害效应〔J〕. 冰川冻土,2013,35(6):1 355 –1 370.〔Shen Yongping,Su Hongchao,Wang Guoya,et al. The responses of glaciers and snow cover to climate change in Xinjiang (Ⅱ): Hazards effects〔J〕. Journal of Glaciology and Geocryology,2013,35(6):1 355 –1 370.〕

〔11〕 王姣妍,谢蕾. 中国天山西部匹里青河的洪水及其成因〔J〕. 干旱区研究,2011,28(5):756 –760.〔Wang Jiaoyan,Xie Lei. Analysis on the change of flood and its formation causes in the Piliqing River Basin〔J〕. Arid Zone Research,2011,28(5):756 –760.〕

〔12〕 毛炜峄,陈鹏翔,沈永平. 气候变暖背景下 2015 年夏季新疆极端高温过程及其影响〔J〕. 冰川冻土,2016,38(2):291 –304.〔Mao Weiyi,Chen Pengxiang,Shen Yongping. Characteristics and effects of the extreme maximum air temperature in the summer of 2015 in Xinjiang under global warming〔J〕. Journal of Glaciology and Geocryology,2016,38(2):291 –304.〕

〔13〕 Karl T R,Kukla G,Gavin J. Decreasing diurnal temperature range in the United States and Canada from 1941 through 1980〔J〕. Journal of Climate and Applied Meteorology,1984,23(11):1 489 –1 504.

〔14〕 任福民,高辉,刘绿柳,等. 极端天气气候事件监测与预测研究进展及其应用综述〔J〕. 气象,2014,40(7):860 –874.〔Ren Fumin,Gao Hui,Liu Lüliu,et al. Research progresses on extreme weather and climate events and their operational applications in climate monitoring and prediction〔J〕. Meteorological Monthly,2014,40(7):860 –874.〕

〔15〕 翟盘茂,任福民. 中国近四十年最高最低温度变化〔J〕. 气象学报,1997,55(4):418 –429.〔Zhai Panmao,Ren Fumin. On changes of China's maximun and minimum temperatures in the recent 40 years〔J〕. Acta Meteorologica Sinica,1997,55(4):418 –429.〕

〔16〕 任福民,翟盘茂. 1951—1990 年中国极端气温变化〔J〕. 大气科学,1998,22(2):217 –227.〔Ren Fumin,Zhai Panmao. Study on changes of China's extreme temperatures during 1951 –1990〔J〕. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,1998,22(2):217 –227.〕

〔17〕 周雅清,任国玉. 中国大陆 1956—2008 年极端气温事件变化特征分析〔J〕. 气候与环境研究,2010,15(4):405 –417.〔Zhou Yaqing,Ren Guoyu. Variation characteristics of extreme temperature indices in mainland China during 1956 –2008〔J〕. Climatic and Environmental Research,2010,15(4):405 –417.〕

〔18〕 叶殿秀,尹继福,陈正洪,等. 1961—2010 年我国夏季高温热浪的时空变化特征〔J〕. 气候变化研究进展,2013,9(1):15 –20.〔Ye Dianxiu,Yin Jifu,Chen Zhenghong,et al. Spatiotemporal change characteristics of summer heatwaves in China in 1961 –2010〔J〕. Climate Change Research,2013,9(1):15 –20.〕

〔19〕 毛炜峄,张祖莲. 1951—2015 年乌鲁木齐市升温过程频数及强度气候特征〔J〕. 沙漠与绿洲气象,2016,10(6):11 –18.〔Mao Weiyi,Zhang Zulian. Climate characteristics of frequency and in-

tensity for the temperature rising processes in Urumqi during 1951 -2015〔J〕. Desert and Oasis Meteorology, 2016, 10(6): 11 - 18.〕

〔20〕毛炜峄,姚俊强,曹兴. 1951—2015 年乌鲁木齐市极端升温过程气候变化特征〔J〕. 气候变化研究进展,2017,13 (3):213 - 222.〔Mao Weiyi, Yao Junqiang, Cao Xing. The change characteristics of extreme temperature-rising process in Urumqi City during 1951 -2015〔J〕. Climate Change Research, 2017, 13(3): 213 - 222.〕

〔21〕张震,刘时银,魏俊锋,等. 东帕米尔高原昆盖山跃动冰川遥感监测研究〔J〕. 地理科学进展,2018,37(11):1 545 - 1 554.〔Zhang Zhen, Liu Shiyin, Wei Junfeng, et al. Monitoring a glacier surge in the Kungey Mountain, Eastern Pamir Plateau using remote sensing〔J〕. Progress in Geography, 2018, 37(11): 1 545 - 1 554.〕

〔22〕朱颖彦,杨志全,廖丽萍,等. 中巴喀喇昆仑公路冰川地貌地质灾害〔J〕. 灾害学,2014,29(3):81 - 90.〔Zhu Yingyan, Yang Zhiquan, Liao Liping, et al. Glacialized geomorphological geohazard along China-Pakistan International Karakoram Highway〔J〕. Journal of Catastrophology, 2014, 29(3): 81 - 90.〕

〔23〕张学进. 中巴公路沿线地质灾害分布特征及防治〔J〕. 重庆工商大学学报(自然科学版),2013,30(2):45 - 50.〔Zhang Xuejing. Study on the distribution characteristics and control for geological disasters along International Karakoram Highway(KKH)〔J〕. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2013, 30(2): 45 - 50.〕

Change Characteristics of Extreme Temperature-rising Process in the East Pamirs during 1961 - 2017

MAO Wei-yi[1,2], YAO Jun-qiang[1,2], CHEN Jing[1,2], LI Shu-juan[1,2], LI Hong-jun[1,2], SHEN Yong-ping[3]

(1. *Institute of Desert Meteorology. China Meteorological Administration, Urumqi* 830002, *Xinjiang, China*;
2. *Center of Central Asia Atmospheric Science Research, Urumqi* 830002, *Xinjiang, China*;
3. *Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou* 730000, *Gansu, China*)

Abstract: The single-station databases of temperature-rising process at 3 meteorological stations including Tashkurgan, Turgart and Wuqia in the east Pamirs were established using the data of daily maximum temperature from January 1, 1961 to December 31, 2017. The three databases of extreme temperature-rising process were selected using the percentile method of comprehensive intensity. The change characteristics of frequency and intensity of extreme temperature-rising process at the three stations were compared and analyzed. The results showed that: ① There were totally 489 extreme temperature-rising processes, and the annual average was 8.6 times at Taxkorgan Meteorological Station in the east Pamirs from 1961 to 2017. At Taxkorgan, the average duration of extreme temperature-rising process was 3.6 days, the occurring frequency of 3 - day duration was the highest and accounted for 24.7% of the total. The 2 - 3 - day duration was dominant at Turgart and Wuqia. The extreme temperature-rising process occurred most frequently in July at Taxkorgan, in May at Turgart and in January at Wuqia; ② The extreme temperature-rising process with the strongest comprehensive intensity at Taxkorgan occurred during February 20 - 21, 2008. The comprehensive intensity of extreme temperature-rising processes was the strongest in winter at the 3 stations in the east Pamirs; ③ In recent 57 years, the annual frequency of extreme temperature-rising process was in a significant linear increasing trend, and the decadal increase rate was 0.57 times at Taxkorgan. The extreme temperature-rising process was relatively frequent from the beginning of the 21st century, and the interannual variability was intensified. The linear trend of the annual frequency of extreme temperature-rising processes was not significant at Turgart and Wuqia; ④ In recent 57 years, the intensity of the extreme temperature-rising process was in a significant linear increasing trend, and the interannual variation was intensified in recent years. The intensity of extreme temperature-rising process was slightly decreased, and the range of interannual change was decreased in recent years at Wuqia. In a word, at Taxkorgan, the extreme temperature-rising process occurred most frequently in July. The frequency and intensity of extreme temperature-rising process increased significantly at Taxkorgan in past 57 years, and the interannual variation intensified in recent years. Ice-snow melting floods and their derivative geological hazards occurred frequently along the northern section of the "China-Pakistan Economic Corridor" in the east Pamirs.

Key words: extreme temperature-rising process; frequency; intensity; climate change; Pamirs